

Verfahren zur Vermessung und Kalibrierung von Heliostaten

M. Röger, C. Prah, W. Jessen, P. Schwarzbözl (DLR)
J. Sattler, S. Niederwestberg, J. Götsche (SIJ)

21. Kölner Sonnenkolloquium, 04. Juli 2018

„Mehr Strom aus Sonne – Intelligente Betriebs- und Wartungsverfahren im solarthermischen Kraftwerk“



1 Einleitung

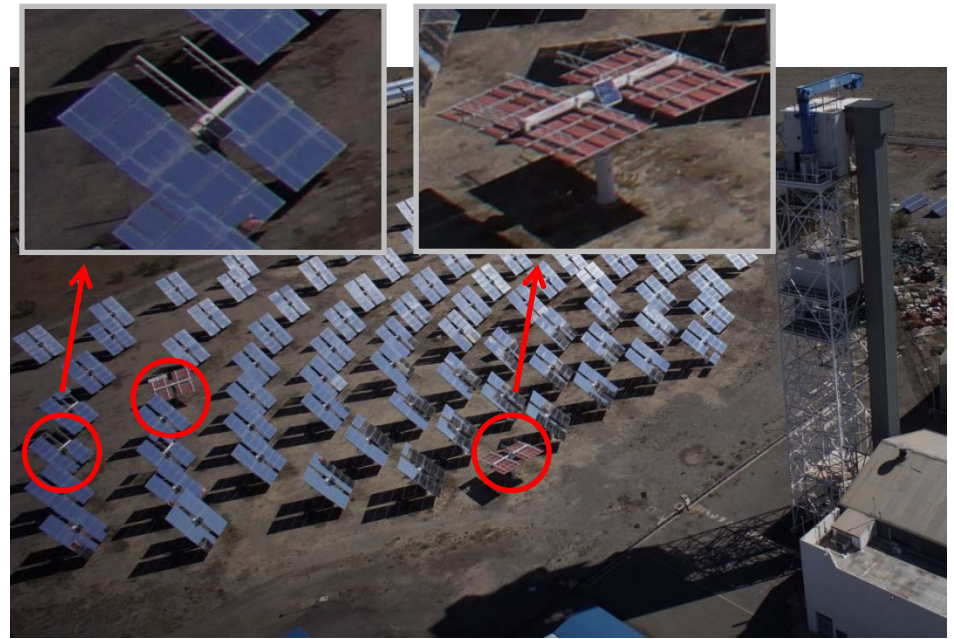
Schlagworte

- Sonnenkolloq. 2018: Intelligente Betriebs- & Wartungsverfahren (von Heliostaten)
- „Heliostaten sind der „Brennstoff“ des Kraftwerks“
- Neben Performance, auch Aspekte der Sicherheit und Receiver-Lebensdauer



Ziel: Verfügbarkeit: 100%

Was bedeutet 100%?: Helio ansprechbar?
Helio trifft Aimpoint?



Verfügbarkeit: <100%



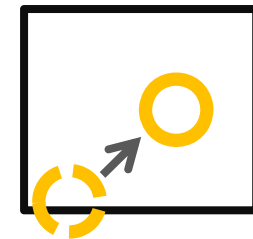
1 Einleitung

Verfügbarkeit und Vermessung

„Verfügbarkeit“ muss näher beschrieben werden...
... über verschiedene **Parameter**
(wenn möglich quantifizierbar)

Heliostat ist **verfügbar**, wenn z.B.:

- Heliostat-Trackingabweichung $< x$ mrad
- Konzentrator-Formabweichung $< x$ mrad
- Verschmutzungsgrad $< x\%$
- Reflexionsgrad $> x\%$ (Abnahme durch Alterung)
- etc.



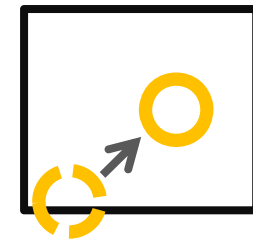
1 Einleitung

Verfügbarkeit und Vermessung

„Verfügbarkeit“ muss näher beschrieben werden...
... über verschiedene **Parameter**
(wenn möglich quantifizierbar)

Heliostat ist **verfügbar**, wenn z.B.:

- Heliostat-Trackingabweichung $< x$ mrad
→ **Kalibrierverfahren**
- Konzentrator-Formabweichung $< x$ mrad
- Verschmutzungsgrad $< x\%$
- Reflexionsgrad $> x\%$ (Abnahme durch Alterung)
- etc.



Übersicht



Einleitung

- 1 **Kalibrierverfahren - Vorbemerkung**
- 2 **Überblick zu Kalibrierverfahren**
- 3 **Drei Verfahren „im Zoom“**
- 4 **Zusammenfassung**



1 Kalibrierverfahren

Vorbemerkungen

(1) Fester/präziser Heliostat

- Hinterlegung der Kinematik in Kalibrierkonstanten, welche einmalig charakterisiert und periodisch (aber eher selten) aktualisiert werden
- Offsets, Achsenfehlstellung, etc.
- „Open-loop“ tracking

(2) Weicher/unpräziser Heliostat

- Hinterlegung in Kalibrierkonstanten nur als Grobausrichtung
- Feinausrichtung über direkte Rückkopplung von Mess-Systemen
- „Closed-loop“ tracking

Kalibrierung? Jeder versteht etwas anderes darunter....

Für diesen Vortrag:

Heliostatkalibrierung: Vermessung der Heliostat-Orientierung in mind. 1 Stellung, der Vergleich der realen Daten mit Solldaten, sowie die Verarbeitung der Abweichungen zur Ableitung von Kalibrationsparametern (1), oder direktem Nachstellen (2).



2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren

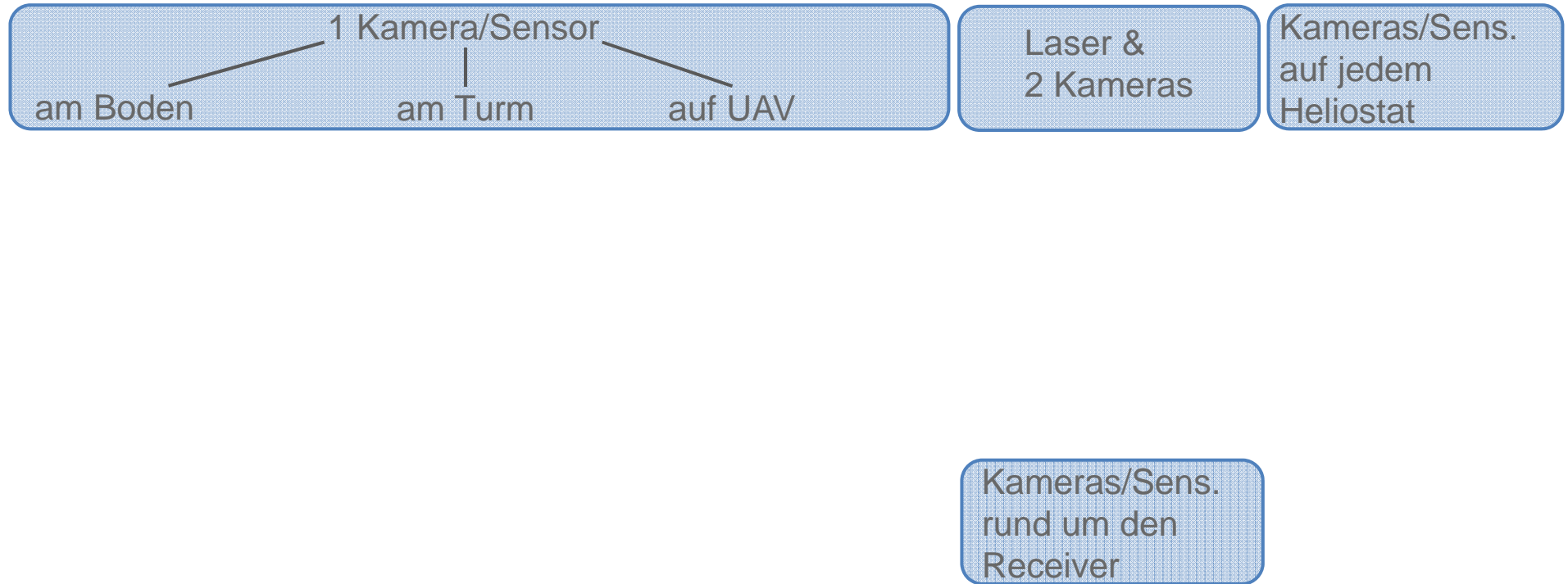
King 1981
Jones 1999
Berenguel 2004
Flesch 2012
Gross 2015
Convery 2011
Bern 2016
Hines 2014
Röger 2010
Prah 2009

Arqueros 2003
Hines 2016
Zavodnya 2015
Dabrowski 2014
Kribus 2004
Goldberg 2015
Fitch 2011
Convery 2013
Coquand 2017
Collins 2017

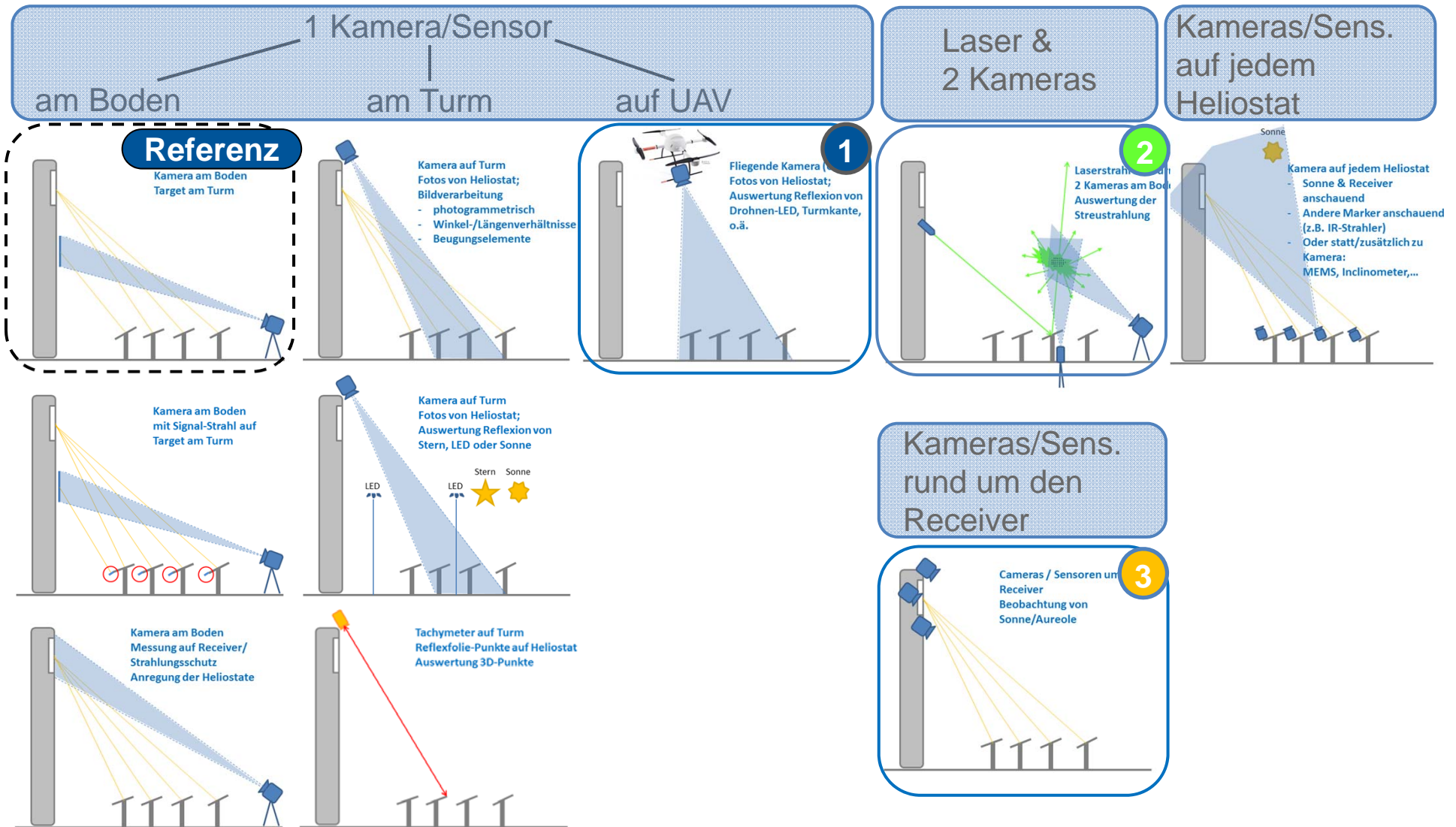
Freeman 2015
Pfahl 2009
Reznik 2011
Litwin 2007
Burisch 2016/17
Sanchez 2018
Harper 2016
Van den Donker 2015
etc.
etc.
etc.



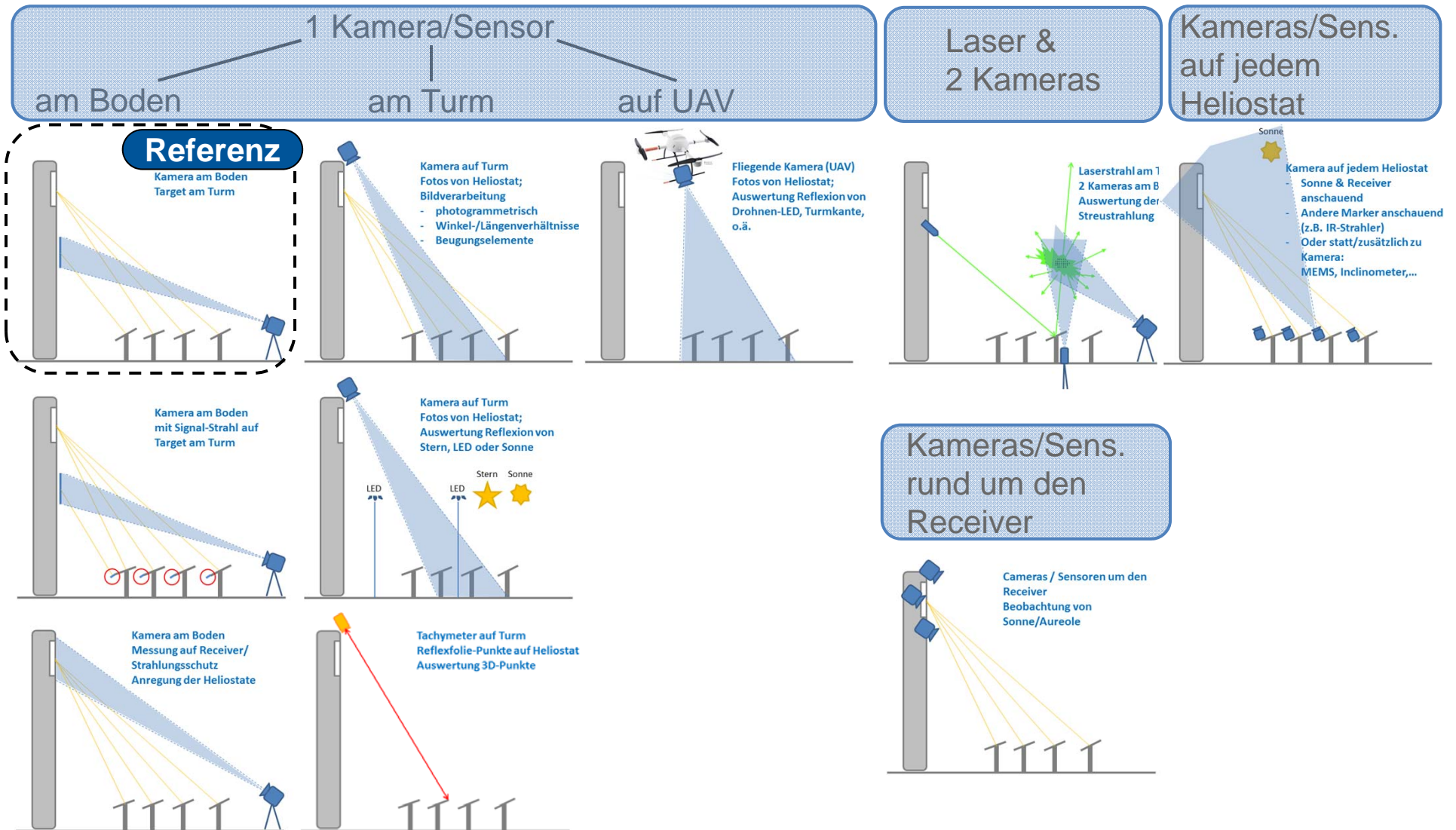
2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren



2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren

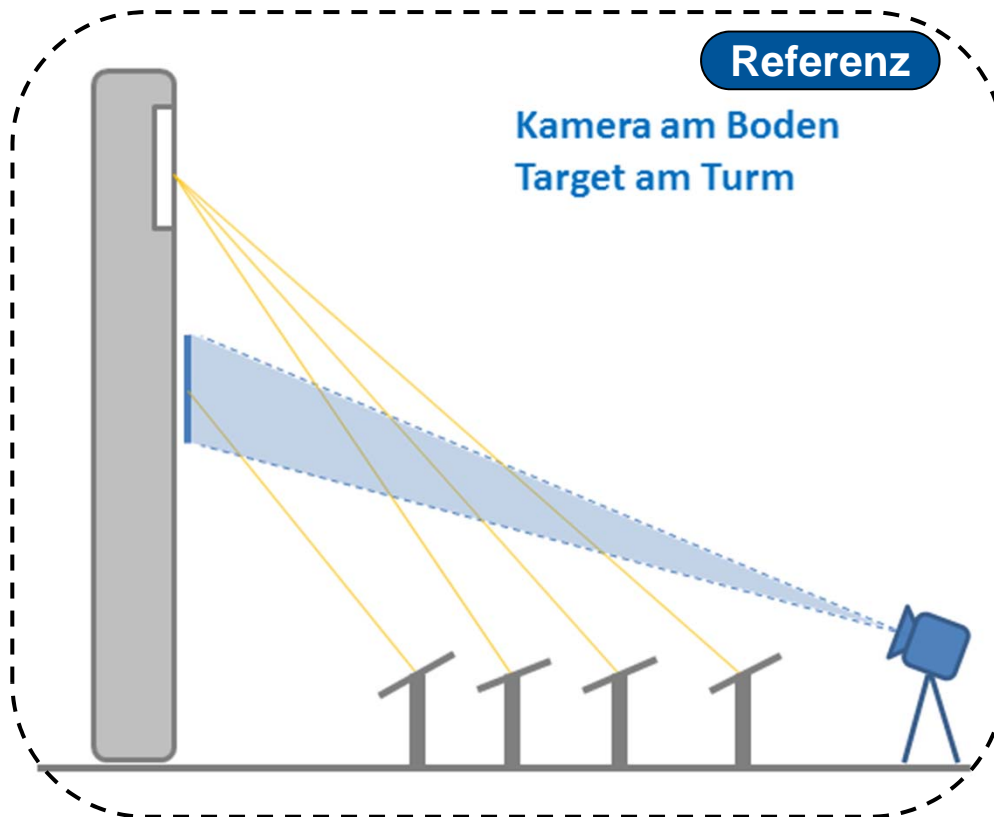


2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren



2 Überblick zu Kalibrierverfahren

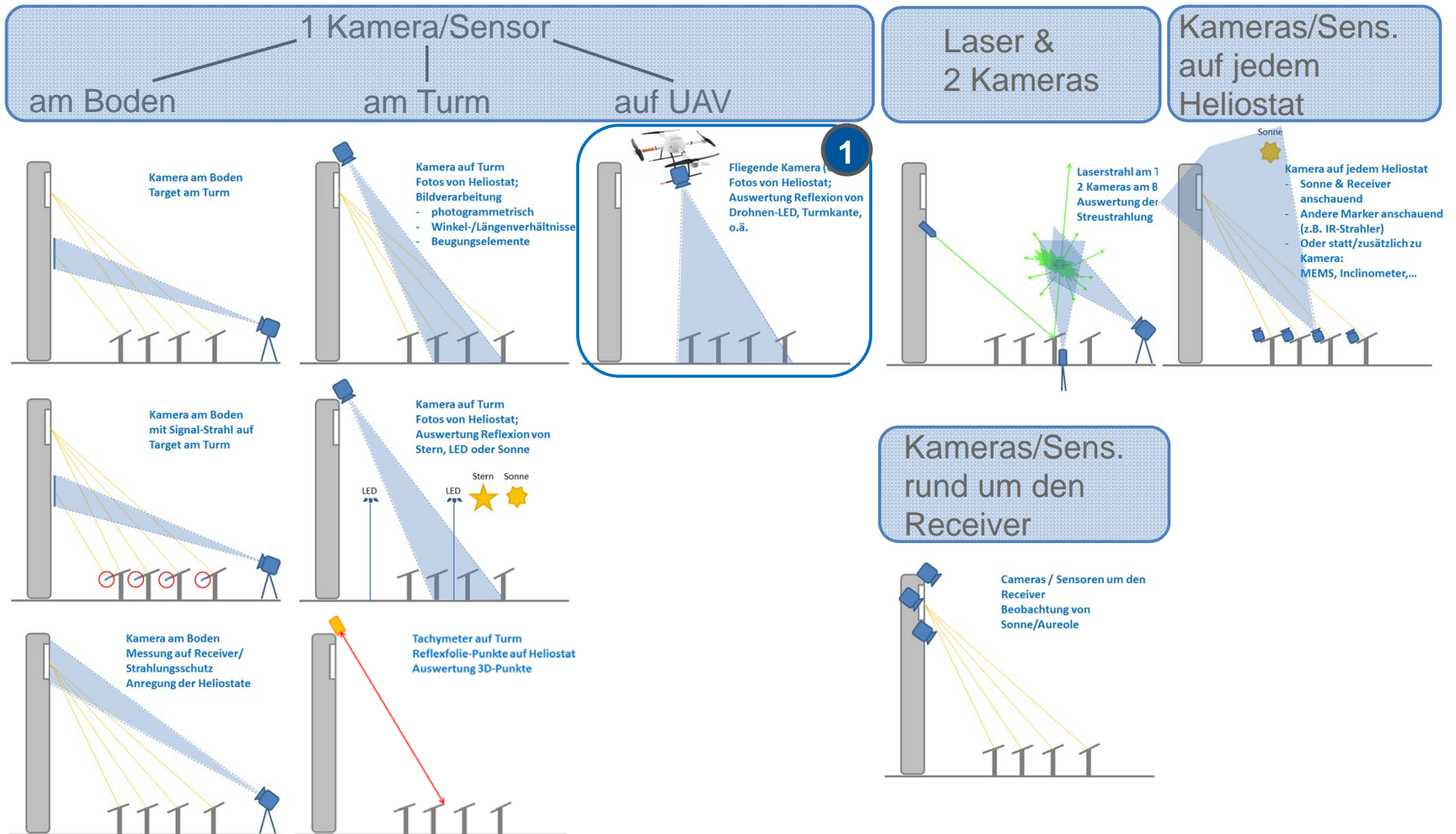
Eine Kamera am Boden



- + hohe Genauigkeit (Feinkalibrierung)
- + relativ simpel
- Sonne notwendig / Abhängigkeit von Sonnenständen
- Turm-Target nötig
- Relativ langsam (Heliostat für Heliostat)
- Grobkalibrierung muss vorliegen



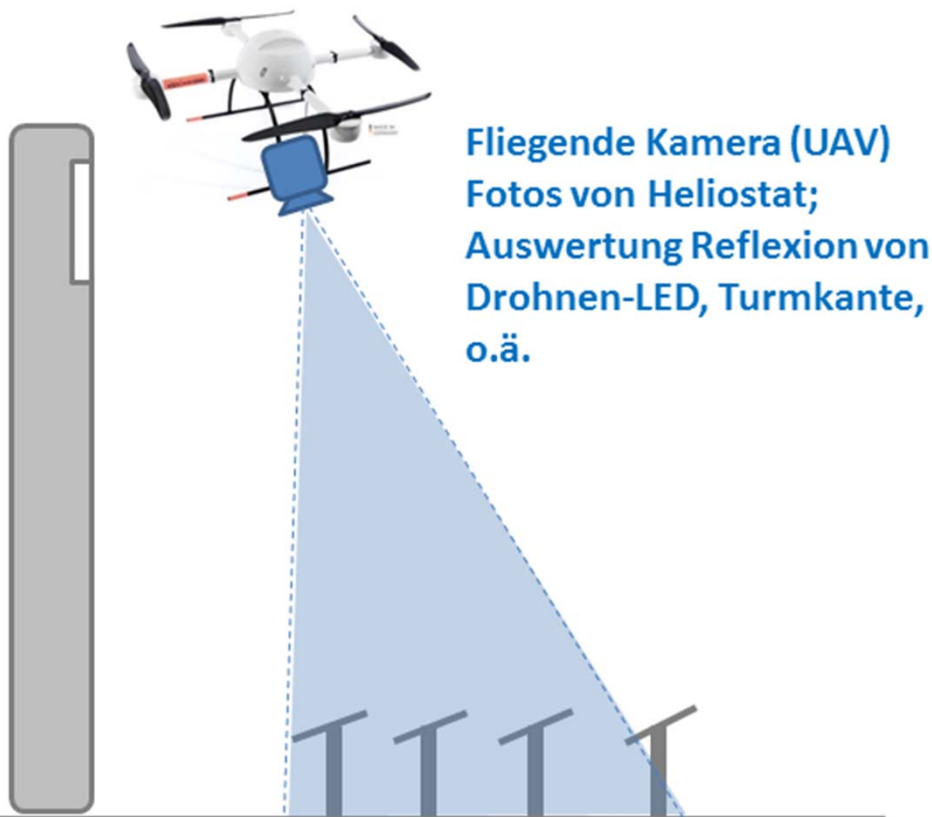
2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren





3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV

Vor- und Nachteile



- + freie Platzierung von LED und Kamera
- + keine Abhängigkeit von Infrastruktur Turm/Target
- + schnelles Verfahren, Reduktion der Ramp-up Zeit¹ von neu gebauten Turmkraftwerken (Kalibrierung in Tagen statt Monaten)
- + keine Sonne nötig
- + Grobkalibration (photogrammetrisch)
- + dann Feinkalibration (reflexbasiert)
- Derzeit noch Drohnen-Operator nötig
- Keine closed – loop Fähigkeit
- ? F&E derzeit in Projekten HelioPoint und Helibo

Schritt a): photogrammetrische Grobkalibration

Schritt b): reflexbasierte Feinkalibration



¹Reduktion der Bauzeit und Inbetriebnahme von 3 auf 2.5 Jahren kann die Stromgestehungskosten um 2.5% reduzieren

3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV

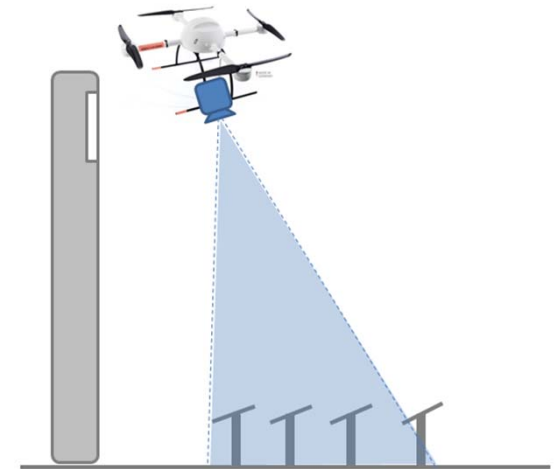
Workflow photogrammetrische Grobkalibration

1a



Vorgehen photogrammetrische Grobkalibration

- Flug zur Erzeugung von Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven vom Heliostat-Feld
- Kanten-, dann Eckenerkennung
- Verwertung aller beobachteten Ecken über Bündelausgleich
- Ergebnis: 3-D Koordinaten und Normalenvektoren





1a

3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Flugrouten photogrammetrische Grobkalibration

Kriterien zur Erzeugung optimaler Bildreihen für Photogrammetrie

- Möglichst idealen 45° Perspektiven-Kegel über Messobjekt
- Erzeugung von Bildern mit hellem Himmelsreflex vor dunklem Boden (geeignet für automat. Eckenerkennung), Bodenreflex vermeiden



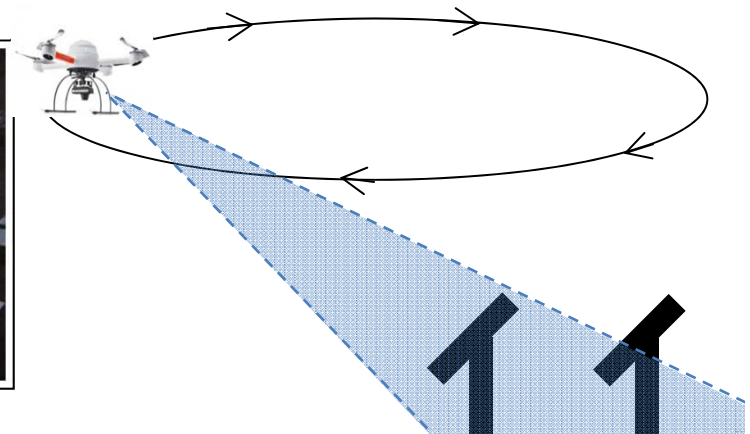
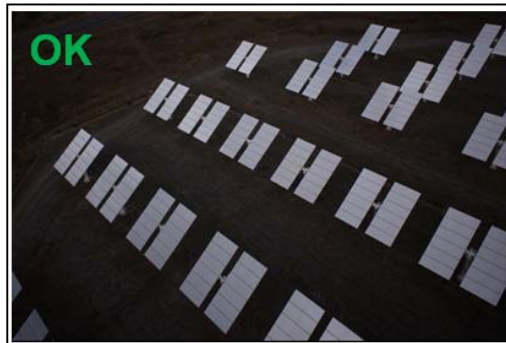


1a

3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Flugrouten photogrammetrische Grobkalibration

Kriterien zur Erzeugung optimaler Bildreihen für Photogrammetrie

- Möglichst idealen 45° Perspektiven-Kegel über Messobjekt
- Erzeugung von Bildern mit hellem Himmelsreflex vor dunklem Boden (geeignet für automat. Eckenerkennung), Bodenreflex vermeiden





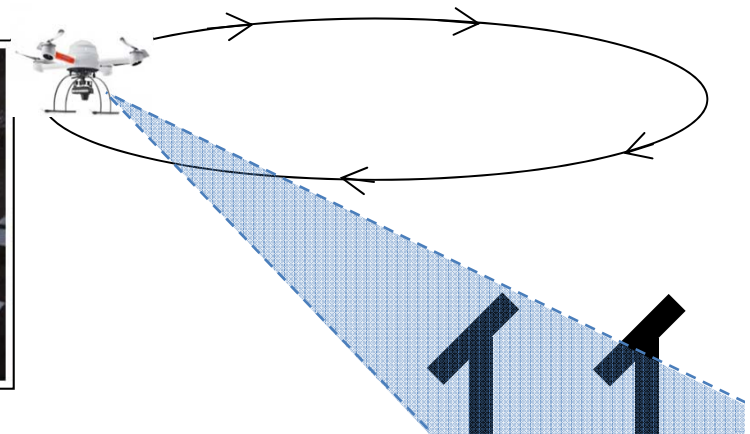
1a

3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Flugrouten photogrammetrische Grobkalibration

Kriterien zur Erzeugung optimaler Bildreihen für Photogrammetrie

- Möglichst idealen 45° Perspektiven-Kegel über Messobjekt
- Erzeugung von Bildern mit hellem Himmelsreflex vor dunklem Boden (geeignet für automat. Eckenerkennung), Bodenreflex vermeiden
- Beachtung der regulatorischen maximalen Flughöhe für UAVs
- Ausreichend Aufnahmen in kurzer Flugzeit
- Beachtung technischer Rahmenbed. wie Auflösung der Bild-Daten, maximale Flug-Geschwindigkeit, Bild-Datenrate, Belichtungszeit, etc.

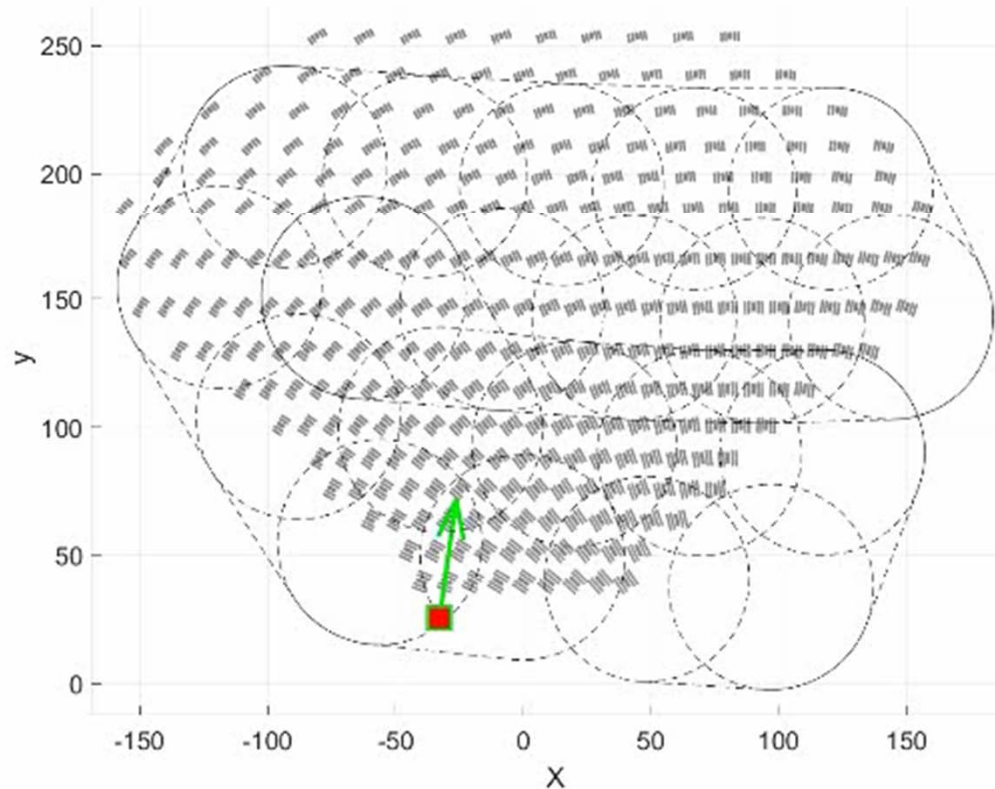
→ Kreise, Mittelpunkt verschoben zu den Heliostaten, in einer oder mehreren Höhen, tangentielle Verbindung





1a

3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Flugrouten für CESA-1



3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Rohdaten für CESA-1

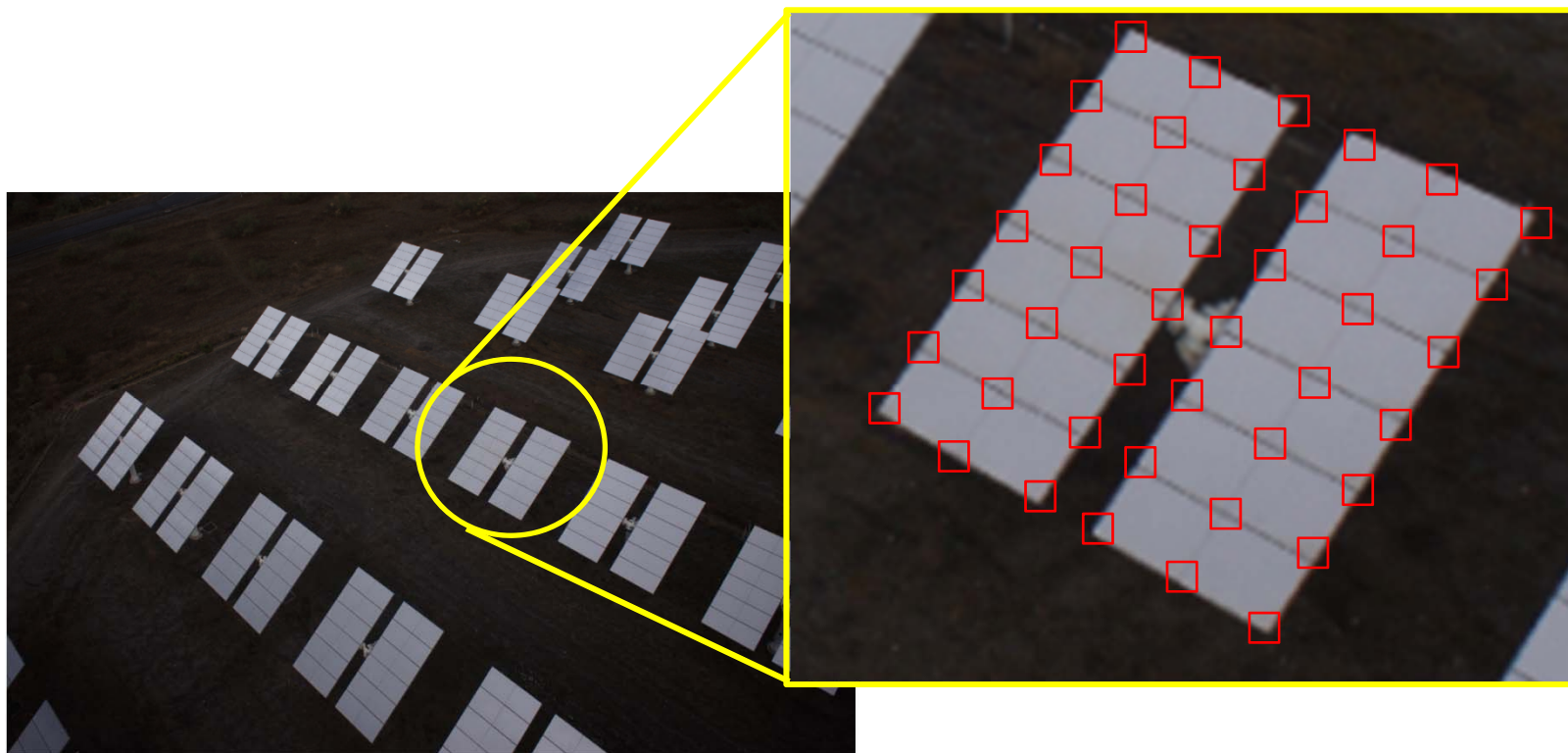
1a





1a

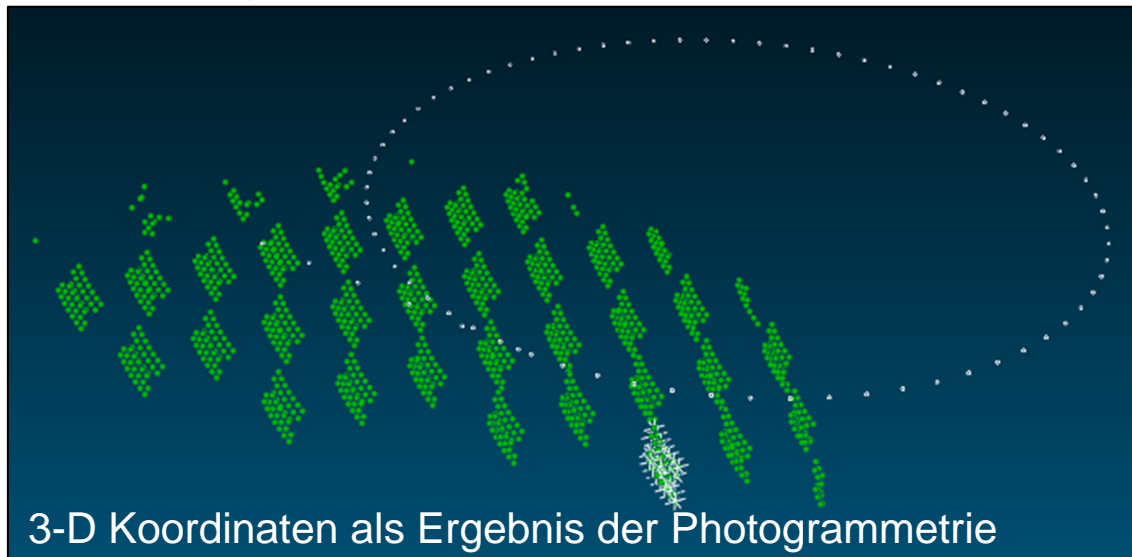
3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Eckenerkennung für Flug CESA-1



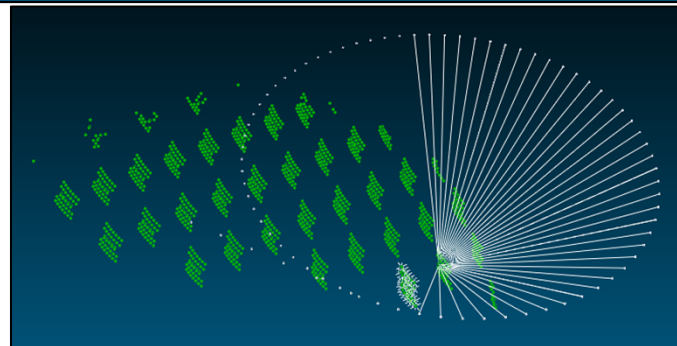


1a

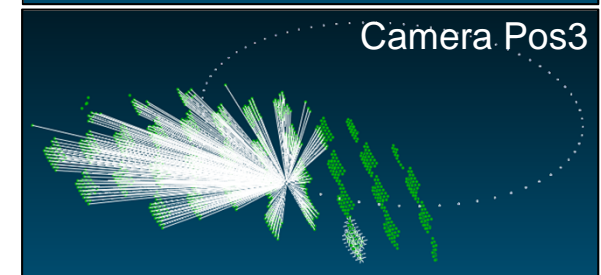
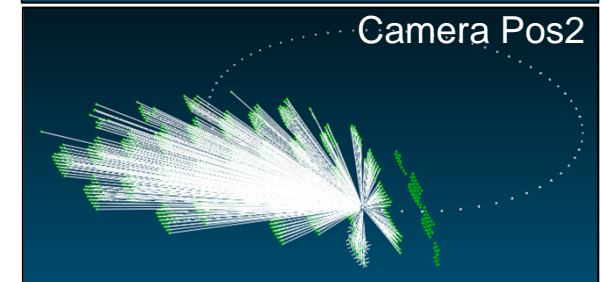
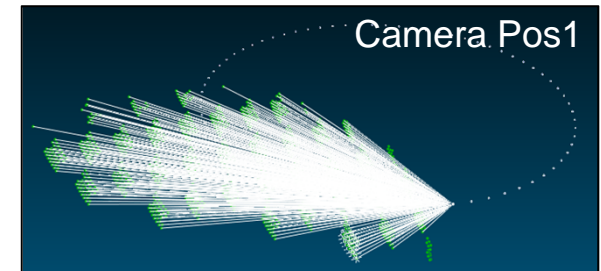
3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Erste Ergebnisse für SIMULIERTEN Flug



Optimierung und
Validierung der
Messgenauigkeit
steht an.



Kamerapositionen, aus welchen
eine Spiegecke berechnet
wurde



Sichtbare Spiegecke pro
Kameraposition



3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV

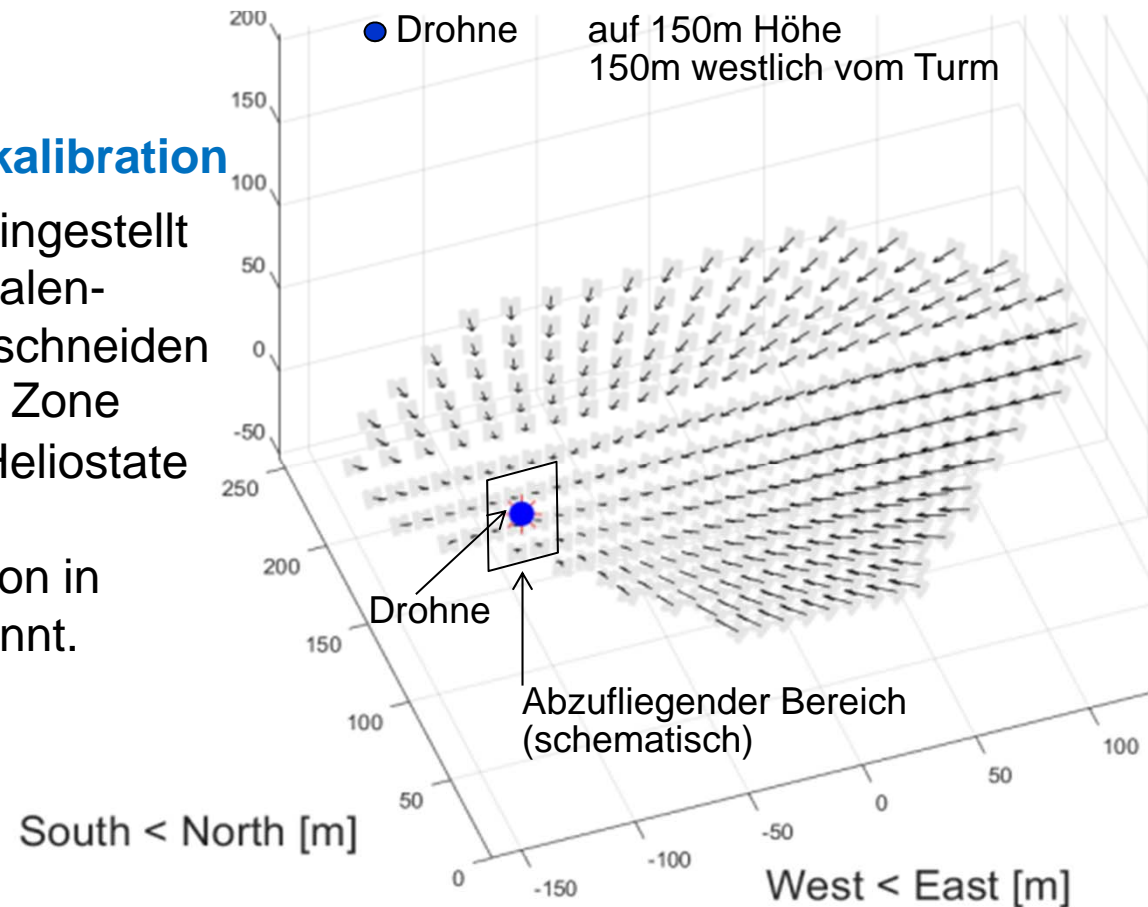
Workflow reflexbasierte Feinkalibration

1a



Vorgehen reflexbasierte Feinkalibration

- Alle Heliostaten werden so eingestellt werden, dass sich ihre Normalenvektoren grob in einer Zone schneiden
- UAV fliegt Mäander in dieser Zone
- Reflexfotos zeigen, welche Heliostate auf die Drohne zielen.
- Drohnen- und Heliostatposition in jedem Foto hochgenau bekannt.
- Ergebnis: Normalenvektoren



3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV Payload für reflexbasierte Feinkalibration: LEDs

1b



Erster Prototyp Payload mit 3 LEDs



Erster Bodentest mit Payload
Reflexion im Heliostat

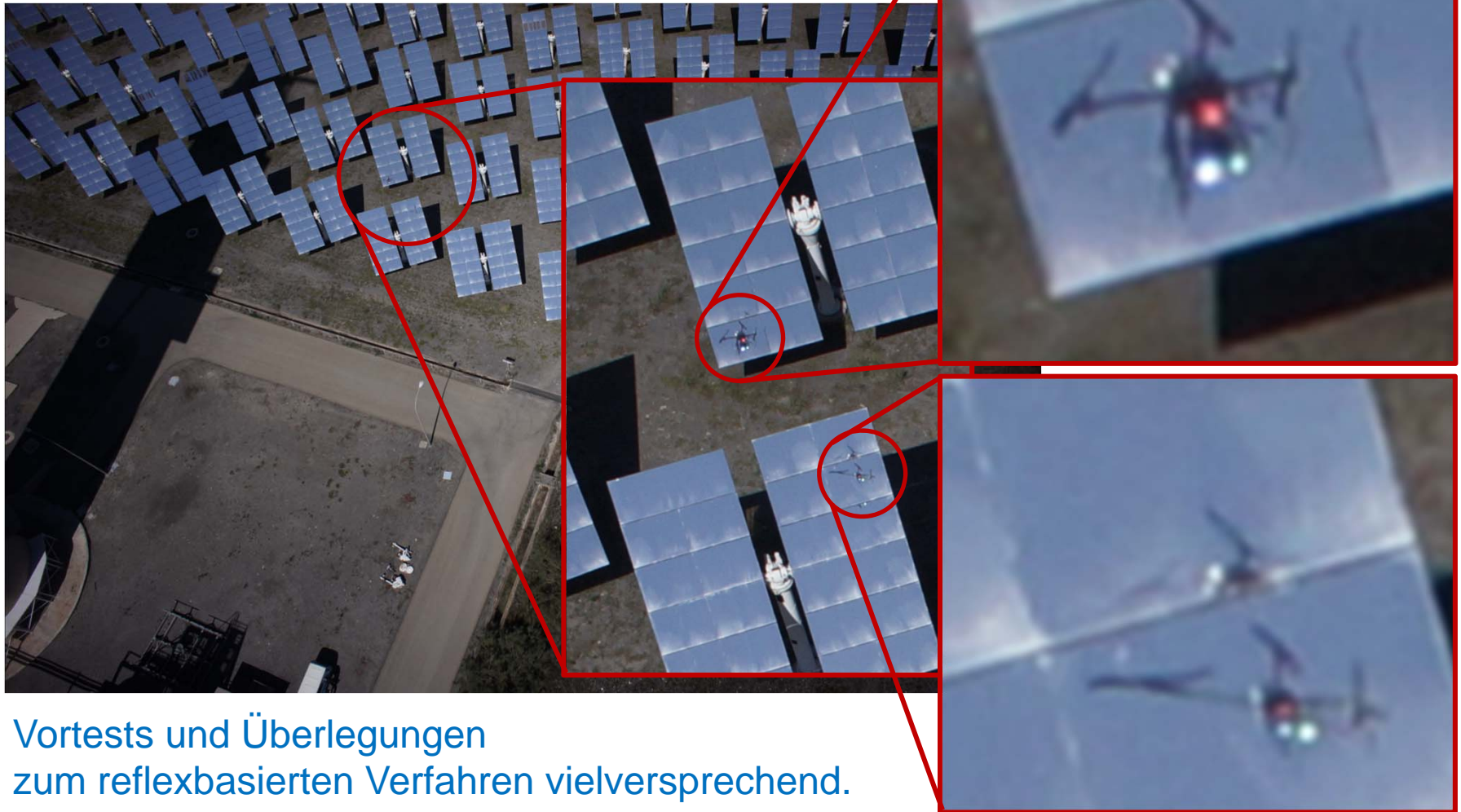




1b

3 Drei Verfahren im Zoom: Eine Kamera auf UAV

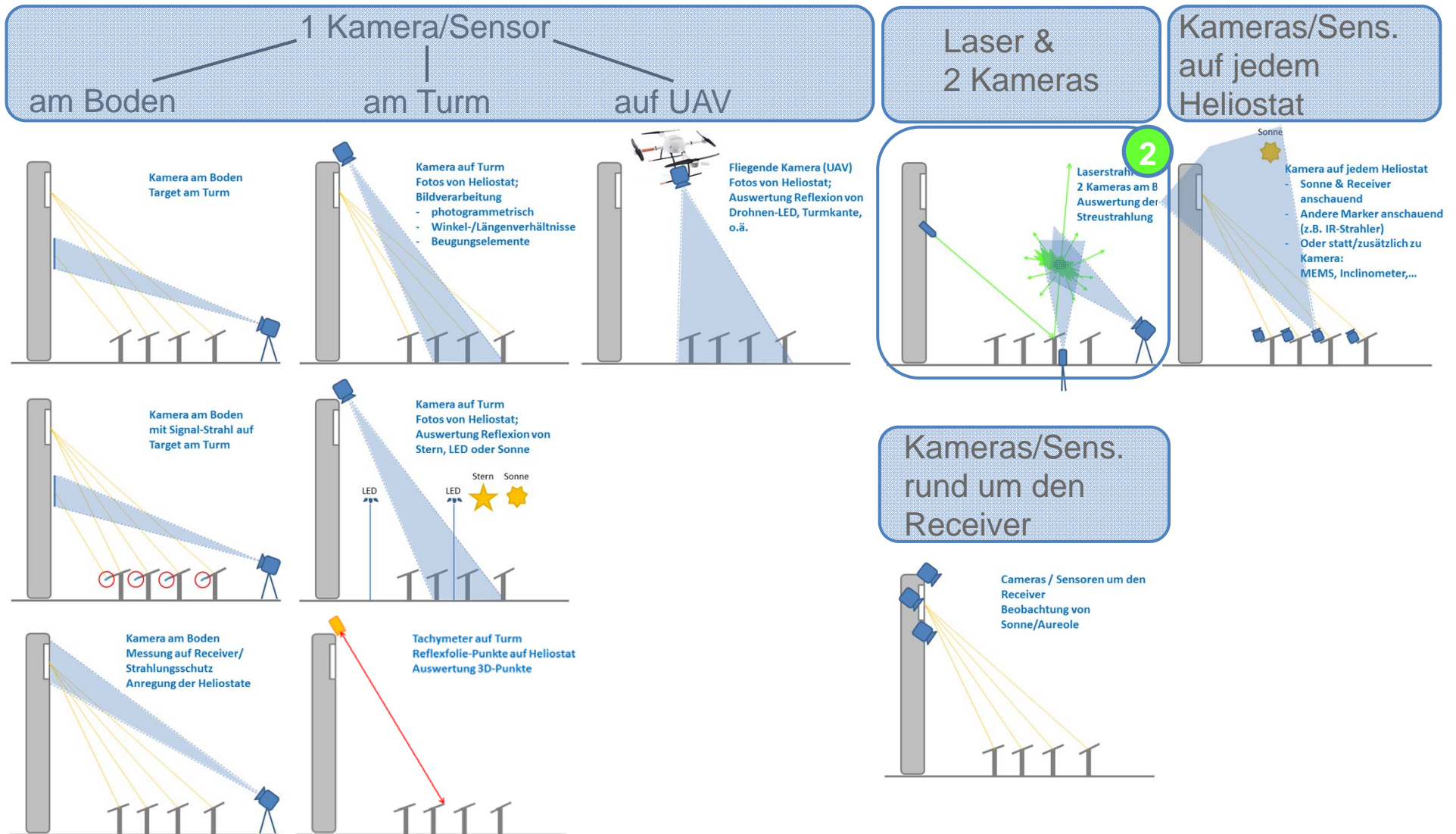
Erste Fotos reflexbasierte Feinkalibration



Vortests und Überlegungen
zum reflexbasierten Verfahren vielversprechend.

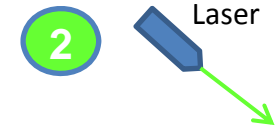
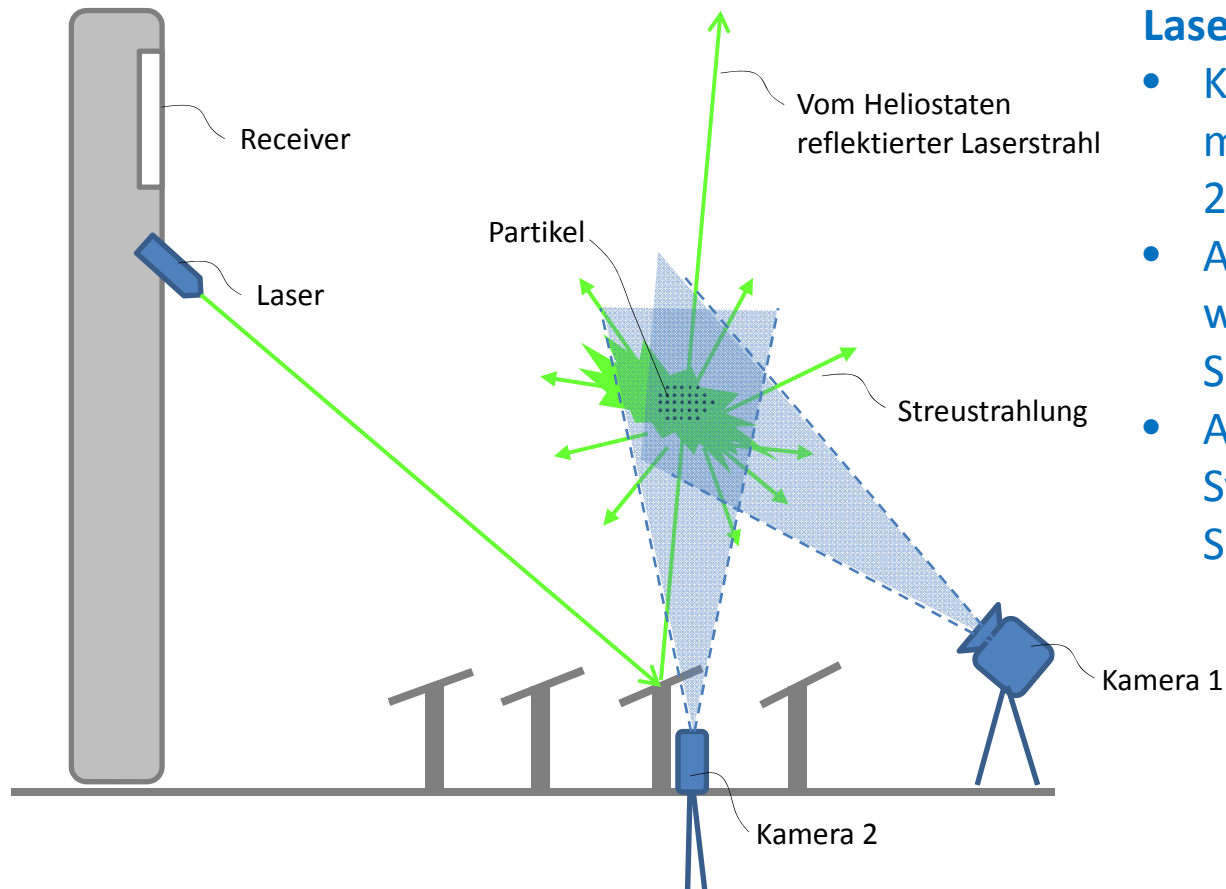


2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren



3 Drei Verfahren im Zoom

Laser-Kamera (SIJ): Konzept



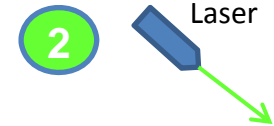
Laser-Kamera-Verfahren:

- Kernkomponenten: 1 Laser mit 2-achsiger Nachführung, 2 Kameras am Boden
- Aus 2 Fotos vom Laserstrahl wird der Vektor und die Spiegelnormale berechnet
- Auslegung des Laser-Kamera-Systems erfolgt für Einsatz bei Solarbetrieb

Prinzipzeichnung des Laser-Kamera-Verfahrens bei Tag im Solarbetrieb © Solar-Institut Jülich, DLR

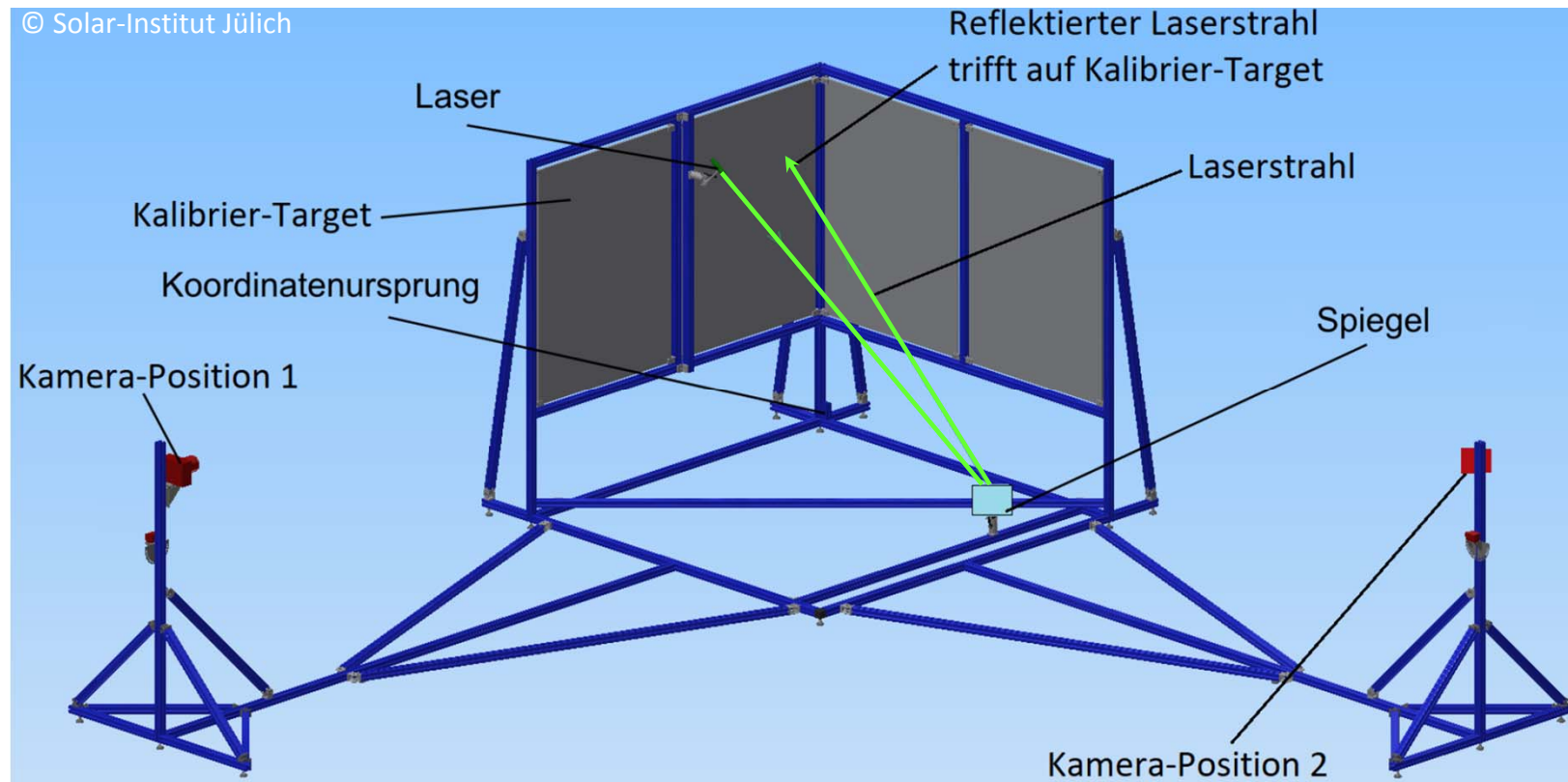


3 Drei Verfahren im Zoom Laser-Kamera-Verfahren (SIJ)



Labor-Prüfstand:

Verifikation des Funktionsprinzips des Laser-Kamera-Verfahrens bei Dunkelheit



FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



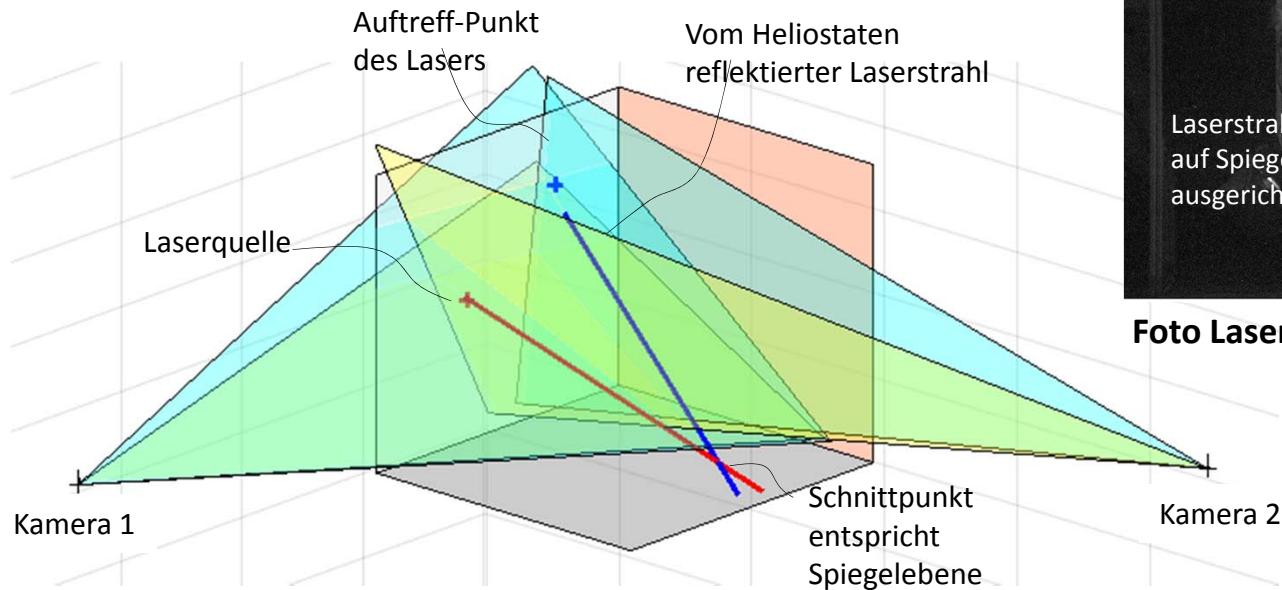
Laboraufbau zur Verifikation des Funktionsprinzips des Laser-Kamera-Verfahrens bei Dunkelheit



3 Drei Verfahren im Zoom Laser-Kamera-Verfahren (SIJ)

Labor-Prüfstand:

Automatische Berechnung des Strahl-Vektors und
Vergleich mit gemessenem Strahlvektor



Laserstrahl-Vektor-Berechnung mit dem Bildanalyse-Tools mit MATLAB

© Solar-Institut Jülich

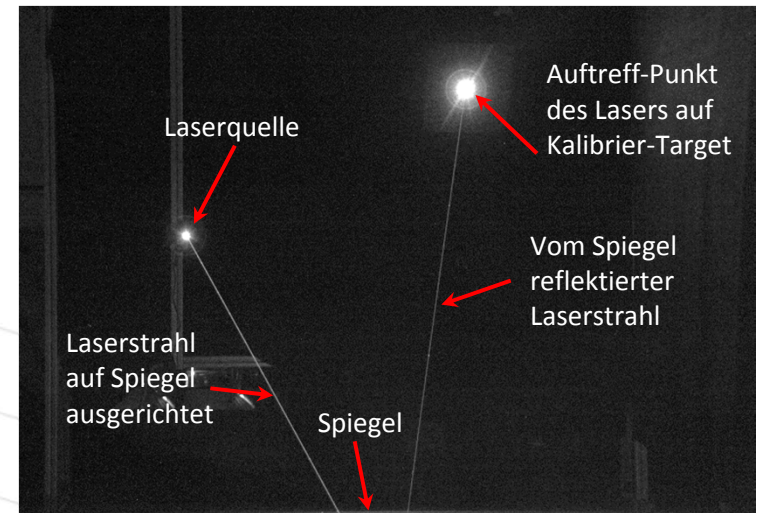
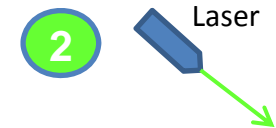
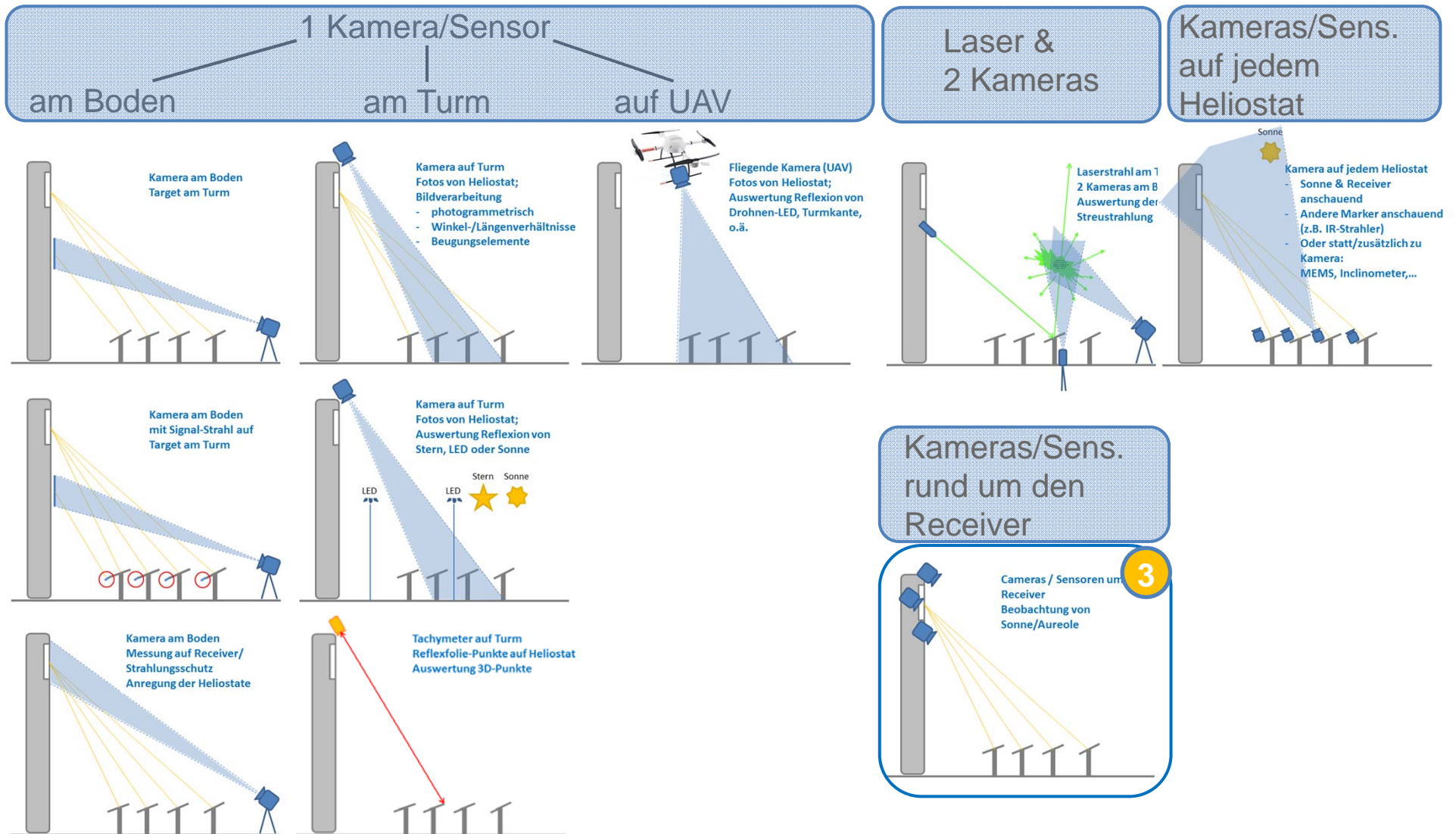


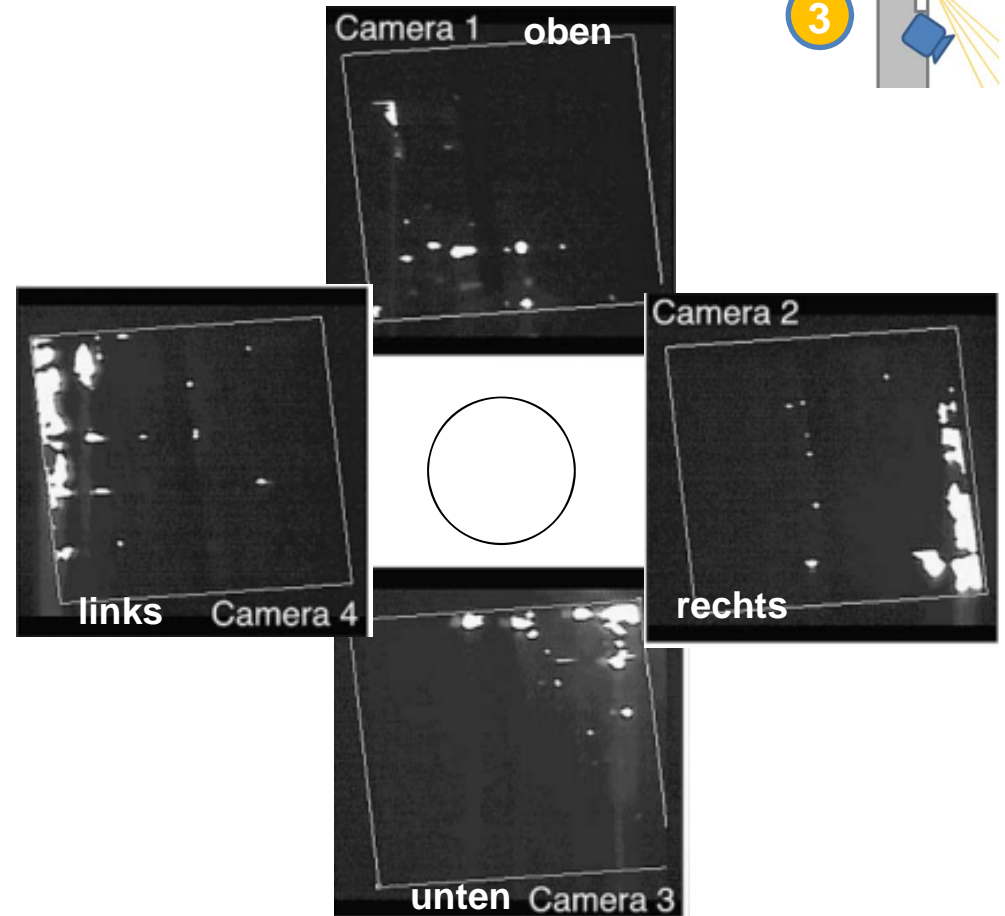
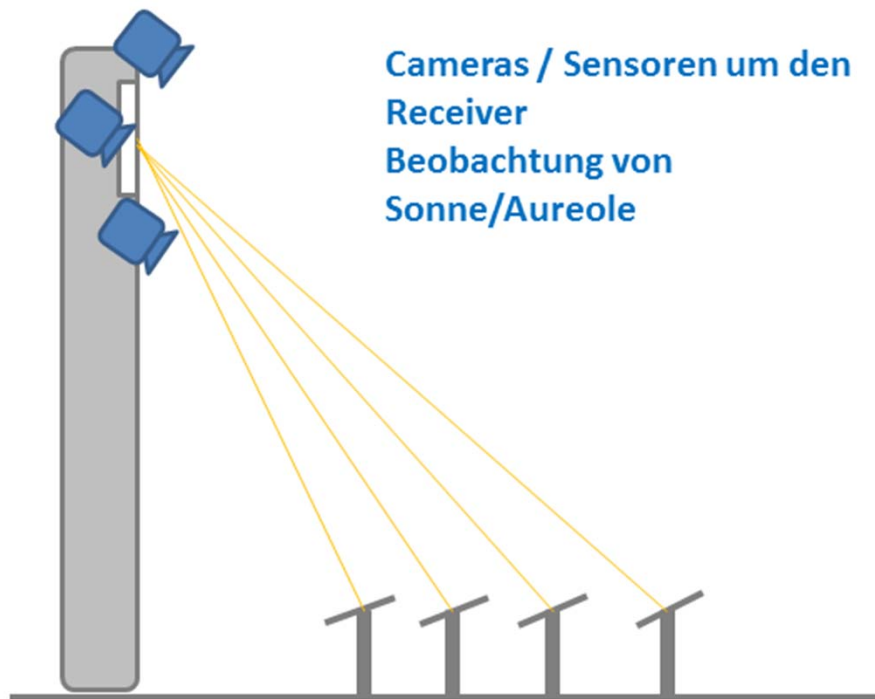
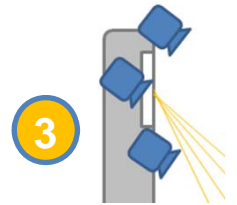
Foto Laserstrahl - Kamera 2

© Solar-Institut Jülich

2 Überblick zu Kalibrierverfahren inkl. Trackingverfahren



3 Drei Verfahren im Zoom Kameras um den Receiver



Heliostat von 4 Kameras fotografiert
Aus: A. Kribus et al. / Energy 29 (2004) 905–913

Derzeit Bearbeitung im DLR am STJ:
Design einer camera oscura, um Überhitzung der Kameras zu vermeiden.



4 Zusammenfassung Heliostat-Kalibrierung

- Die **Verfügbarkeit** von Heliostaten hängt von vielen Faktoren ab.
- Ein zentraler Faktor ist die **Heliostat-Kalibrierung** zur Erreichung der **Aimpoint-Genauigkeit**.
- Deren rasche und einfache **Erreichung** und **Aufrechterhaltung** nach Kraftwerksbau und während des Betrieb ist **essentiell** für Performance, Sicherheit und Receiver-Lebensdauer.
- Es gibt **zahlreiche Ansätze** zur Kalibrierung, aber keinen „perfekten“.
Kamera am Boden; auf Turm; auf UAV; Kameras/Sensoren auf jedem Heliostaten; Kameras rund um den Receiver; mit/ohne Sonne; LEDs, Laser, etc.
- **Drei innovative Ansätze** werden in den Projekten Helibo (NRW) und HelioPoint (BmWi) bearbeitet:
1. Kamera auf UAV, 2. Laser-Kamera-Verfahren (SIJ), 3. Kameras um Receiver
- Diese Ansätze sollen nach erfolgreicher Entwicklung den **deutschen CSP-Anbietern** (Heliostatenfeld und Messdienstleistungen) einen Marktvorteil verschaffen.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

VIELEN DANK für Ihre Aufmerksamkeit.

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Vorhabens HelioPoint (FKN 0324201) und dem Land Nordrhein-Westfalen für die Förderung des Vorhabens Helibo (FKN PRO 0070A).

*Zudem danken wir allen Kollegen für die wertvollen Diskussionen und Hinweise:
A. Pfahl, R. Buck, S. Guiliano, F. Göhring, C. Raeder, O. Kaufhold,
C. Happich, A. Macke, S. Ulmer & weiteren*

Marc Röger
marc.roeger@dlr.de

Knowledge for Tomorrow